

Abstract (Basic): JP 2000329953 A \

NOVELTY - The two dimensional photonic crystal consists of columnar unit (12) with material units (12a,12b). The material units have different refractive index. The material units are formed spirally and continuously linked and arranged on substrate (11).

DETAILED DESCRIPTION - An INDEPENDENT CLAIM is also included for production procedure of photonic crystal.

USE - In optical waveguide, light emitting element and in optical integrated circuit.

ADVANTAGE - Since a full photonic band gap is formed, photonic crystal is reliably produced with novel crystal structure.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The figure shows the perspective diagram of periodic structure of photonic crystal.

Substrate (11)

Columnar unit (12)

Material units (12a,12b)

pp; 10 DwgNo 1/6

Title Terms: PHOTON; CRYSTAL; OPTICAL; WAVEGUIDE; COLUMN; UNIT; CONSIST; MATERIAL; UNIT; FORMING; SPIRAL; CONTINUOUS; LINK; SUBSTRATE

Derwent Class: P81; V07

International Patent Class (Main): G02B-006/12

International Patent Class (Additional): G02B-006/13

File Segment: EPI; EngPI

Manual Codes (EPI/S-X): V07-F01A5

Am3

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-329953

(P2000-329953A)

(43) 公開日 平成12年11月30日 (2000. 11. 30)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テーマコード(参考)

G 0 2 B 6/12
6/13

G 0 2 B 6/12

N 2 H 0 4 7
M

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願平11-139423

(22) 出願日 平成11年 5 月20日 (1999. 5. 20)

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号

(72) 発明者 納富 雅也

東京都新宿区西新宿三丁目19番 2 号 日本
電信電話株式会社内

(72) 発明者 石井 哲好

東京都新宿区西新宿三丁目19番 2 号 日本
電信電話株式会社内

(74) 代理人 100064414

弁理士 磯野 道造

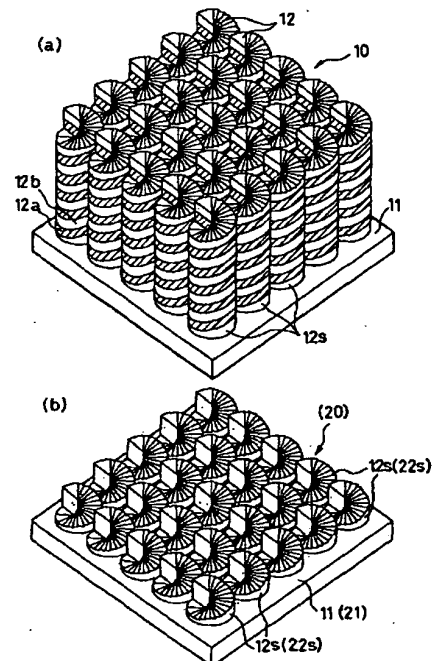
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フォトニック結晶及びその作製方法

(57) 【要約】

【課題】 従来とは異なる新規な結晶構造を持ち、フルフォトニックバンドギャップ及び旋光性を有するフォトニック結晶及びその作製方法を提供する。

【解決手段】 基板 11 上に屈折率の異なる少なくとも 2 種類の材料部分 12a, 12b, , を螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体 12 を 2 次元配列したフォトニック結晶。また、基板 11 上に屈折率の異なる少なくとも 2 種類の材料部分 12a, 12b, , を螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体 12 を 2 次元配列したフォトニック結晶の作製方法であって、基板 11 上に最初の螺旋一段分 12s を形成して 2 次元配列させる工程 (A) の後、前記最初の螺旋一段分 12s の上に、屈折率の異なる少なくとも 2 種類の材料部分 12a, 12b, , を互い違いに順次螺旋一段分ずつ積層させる工程 (B) を繰り返して行なうこと。



の様々な光ファイバを構成する基本構造であるフォトニック結晶及びその作製方法に関する。

【0002】

【従来の技術】3次元的な誘電体周期構造中では、光は周期的振動を受け、その周波数の分散関係は結晶中の電子のバンド構造と同じ様なバンド構造をとり、このような誘電体周期構造はフォトニック結晶 (Photonic Crystal) と呼ばれている。フォトニック結晶中の光の伝搬はバンド構造によって決定されるため、結晶構造や周期的振動の大きさを制御することにより、その光学的性質を自由に設計することが可能である。例えば、フォトニック結晶は、フォトニック結晶を構成する材料間の屈折率比を大きくし、周期構造を適切に選定すれば、強力な光閉じ込め能などを発揮する。このフォトニック結晶は、超高密度光集積回路や超高効率発光素子への適用が期待されている。

【0003】フォトニック結晶の有用性は、1987年にYablonoitchにより、3次元的にバンドギャップが開いたフォトニック結晶 (フォトニックバンドギャップ材料) を用いて光を完全に閉じ込めることができるという指摘 (E. Yablonoitch, Phys. Rev. Lett. 58, 2059 (1987)) により注目されるようになったが、当時のフォトニック結晶はミリメートル周期の大きな構造であり、波長の長い電磁波 (マイクロ波など) を使って動作され、評価された。しかし、例えば光通信などに利用される光の波長領域は1〜1.5 μm であり、この波長領域でフォトニック結晶を動作させるには、フォトニック結晶の周期を光の波長オーダーよりも小さくする必要がある。そして、光の波長領域で動作するフォトニック結晶を実現するためには、光の波長以下の加工精度が要求される。したがって、作製可能な結晶構造は限定される。また、3次元的に完全にバンドギャップが開く予想されている結晶構造は、現在まで知られている限りでは、ダイヤモンドやシリコンなどのような技術で作製可能でかつバンドギャップが開くフォトニック結晶の周期構造として、図5に示すようなものが提案されている。

【0004】図5(a)に示すフォトニック結晶50は、先ずバルクの結晶51上にドライエッチング用のマスク52を設け、このマスク52に2次元配列の穴53を形成し、これに斜め角度から3回垂直性の良いドライエッチング用のビーム54によりエッチングを行うことで作製される。図5(a)に示される3本のエッチング用のビーム54、54、54は、それぞれが120度の角度を保ち、また、中心軸Cからの角度はそれぞれ35度になっている。この構造はダイヤモンド構造の(110)軸方向に穴が貫通している構造となっている。実際にはバンドギャップが開くことが計算により実証

【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上に屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分が螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体を2次元配列したことを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項2】 基板上に屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分が螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体を2次元配列したフォトニック結晶の作製方法であって、

工程(A)の後、前記最初の螺旋一段分を形成して2次元配列させる基板の上に最初の螺旋一段分を形成して2次元配列させる工程(A)の後、

【請求項3】 前記工程(B)が、バイアスバタにより、前記工程(A)において基板上に2次元配列した形状を保持しつつ、前記屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を互いに順次螺旋一段分ずつ積層させるものであること、を特徴とする請求項2に記載のフォトニック結晶の作製方法。

【請求項4】 前記工程(A)が、フォトニック結晶を作製する基板とは異なる他の基板上に前記最初の螺旋一段分に相当する螺旋一段分を2次元配列させ、この他の基板を押し型として、前記基板上に形成された薄膜に前記押し型を押し付けることにより前記基板上に前記最初の螺旋一段分を転写して2次元配列させるものである

り、前記工程(B)が、前記最初の螺旋一段分の上に、屈折率の異なる少なくとも2種類の材料を順次螺旋一段分ずつ塗布して薄膜を形成し、この螺旋一段分の薄膜を形成することにより前記押し型により前記螺旋一段分を転写して順次螺旋一段分ずつ積層させる工程であることを、特徴とする請求項2に記載のフォトニック結晶の作製方法。

【請求項5】 前記基板又は前記他の基板上にレジストを塗布した後、電子ビームリソグラフィ露光を行ない、この露光中に露光ドーズ量を前記レジスト上の場所により変化させることで、

前記最初の螺旋一段分又は前記螺旋一段分を作製するためのレジストパターンに基づいて前記基板上に前記最初の螺旋一段分を2次元配列させ、又は前記他の基板上に前記螺旋一段分を2次元配列させること、を特徴とする請求項2乃至請求項4のいずれかの一項に記載のフォトニック結晶の作製方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、光情報処理や光伝送などに用いられるレーザ、光導波路、光集積回路など

されており、マイクロ波領域では実験的に検証が行われている。

【0005】また、図5(b)は、一定間隔で並んだロッド59, 59, . . . を、位相を半周期ずつずらしながら90度回転して重ねていくことにより形成されるフォトニック結晶60であり、マイクロマシン技術を応用することにより波長12μm程度のものまで作製されている(S-Y.Lin et al., Nature 394, 251(1998))。この場合もロッド59の方向がダイヤモンド構造の(110)軸方向に相当しており、フルフォトニックバンドギャップが開くことが計算により示されている。なお、フルフォトニックバンドギャップとは「全ての方向に進行する光に対してフォトニックバンドギャップの開いた状態」をいう。

【0006】しかし、図5に示したものは、ある程度以上の層数を持つ結晶構造を作成することは極めて困難である。またいずれの方法でも、現在までに実際に作製されているフォトニック結晶は、ギャップが赤外又はマイクロ波領域に位置するものであり、近赤外、可視光の領域で完全にバンドギャップの開いた3次元フォトニック結晶は実現していない。

【0007】また、前記したフルフォトニックバンドギャップ以外のフォトニック結晶の代表的な応用例として、直線偏光子がある。フォトニック結晶中においては、許される伝搬モードが異方的になるため人工的な複屈折性を持ち、これを利用してフォトニック結晶を直線偏光子として用いることができる。通常の直線偏光子は物質が持つ複屈折性を利用するか、または異方的な吸収(2色性)を用いて作製されているが、フォトニック結晶を用いると吸収を伴わず大きな異方性を持つので、高い性能の直線偏光子を実現することができる。直線偏光子は図6(a)(b)のように二つの独立な2方向の間で対称性を崩した周期構造を作れば実現されるので、比較的容易に作製できる(最も単純には交互多層膜もそのような異方性を持つ1次元フォトニック結晶である)。なお、図6(a)は板状体71を直列に並べた直線偏光子70を、図6(b)は柱状体81を二次元配列した直線偏光子80を示す。フォトニック結晶が持ちうる光学異方性は、直線偏光に限らず原理的には崩れた対称性に応じた異方性を持ちうるが、今までのところ直線偏光子以外にこのようなフォトニック結晶の異方性を利用したものは存在しない。例えば、回転対称性が崩れた構造であれば、旋光性(又は光学活性)を生じる。物質の旋光性(又は光学活性)は、テレピン油のような光学異性体を持つ分子構造で構成される等方性媒質や、水晶のような特定の対称性を持った結晶構造において発現する現象であり、物質固有の性質である。旋光性は直線偏光制御、円偏光制御において極めて重要で、この性質を利用して1/2波長板、1/4波長板などの光学部品が作られている。しかし、旋光性そのものは非常に小さく(水

晶で10度/㎜程度)、またその大きさを人工的に制御することも困難であった。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】本発明では、従来研究され、また作製されてきたフォトニック結晶において、その結晶構造が図5などに代表される構造に限定されていたため、実現される機能に制限があったという問題点を解決することを目的とする。つまり本発明は、従来とは異なる結晶構造を持ち、フルフォトニックバンドギャップ及び旋光性を有する新規なフォトニック結晶及びその作製方法を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明は、基板上に屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体を2次元配列したフォトニック結晶を提案する(請求項1)。積層する材料が2種類であれば柱状体は二重螺旋構造になる。このような3次元的な螺旋構造を有するフォトニック結晶はダイヤモンド構造に似た対称性を持ち、フルフォトニックバンドギャップを持ちうるということが理論計算により証明されている(A.Chutinan and S.Noda, Physical Review B 57, R2006(1998))。また、このフォトニック結晶の構造を上面から見た場合、右回りと左回りの対称性が崩れているため、右水晶と左水晶の場合と同じように旋光性を持ちうる。なお、フルフォトニックバンドギャップとは、全ての方向に進行する光に対してフォトニックバンドギャップの開いた状態をいう。ここで、特許請求の範囲の記載における2次元配列とは、一定の規則性に基づいて柱状体を基板上に並べることを意味するが、2次元配列には、この一定の規則性を別の規則性に基づいて乱すことにより構成される2次元配列も含む。

【0010】また、本発明は、基板上に屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体を2次元配列したフォトニック結晶の作製方法であって、基板上に螺旋一段分の形状を形成して2次元配列させる工程

(A)の後、前記螺旋一段分の形状の上に、屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を互い違いに順次一段分ずつ積層させる工程(B)を繰り返して行なうフォトニック結晶の作製方法を提案する(請求項2)。これによれば、格子状に面内に二次元配列した螺旋一段分の形状を作製し、この螺旋一段分の形状を足がかりにして屈折率の異なる材料部分を螺旋一段分ずつ積み上げ、結果として請求項1に記載のフォトニック結晶を作製する。

【0011】また、本発明は、前記工程(B)が、バイアスバックにより、前記工程(A)において基板上に2次元配列した形状を保持しつつ、前記屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を互い違いに順次螺旋一段分ずつ積層させるものであることを特徴とするフォトニ

ック結晶の作製方法である。これによれば、最初の形状に忠実な形状を維持しつつ、かつ緻密な柱状体を構成することができる。

【0012】また、本発明は、前記工程(A)が、フォトリソニック結晶を作製する基板とは異なる他の基板上に前記螺旋一段分の形状に相当する形状を2次元配列させ、この他の基板を押し型として、前記基板上に形成された薄膜に前記押し型を押し付けることにより該基板上に前記螺旋一段分の形状を転写して2次元配列させるものであり、前記工程(B)が、前記螺旋一段分の形状の上に、屈折率の異なる少なくとも2種類の材料を順次一段分ずつ塗布して薄膜を形成し、この螺旋一段分の薄膜を形成するごとに前記押し型により前記螺旋一段分の形状を転写して順次一段分ずつ積層させる工程であることを特徴とするフォトリソニック結晶の作製方法である(請求項4)。これによれば、塗膜を形成するごとに、押し型により螺旋一段分ずつを転写して行く。押し型は、再利用される。

【0013】そして、本発明は、前記基板又は前記他の基板上にレジストを塗布した後、電子ビームリソグラフィ露光を行ない、この露光中に露光ドーズ量をレジスト上の場所により変化させることで、前記螺旋一段分の形状を2次元配列したレジストパターンを形成し、このレジストパターンに基づいて前記基板又は前記他の基板上に前記螺旋一段分の形状を2次元配列させること、を特徴とするフォトリソニック結晶の作製方法である(請求項5)。露光ドーズ量をレジスト上の場所によって変えることにより、異なる厚さのレジストパターンを形成することができる。このレジストパターンに基づいてエッチングを行ない、螺旋一段分の形状を基板①又は他の基板②上に形成することができる。この基板①は最初の螺旋一段分が形成された基板としてこの上に順次螺旋構造が形成されて、フォトリソニック結晶となる。また、この他の基板②は押し型として螺旋形状の転写(刻印)に使用される。

【0014】

【発明の実施の形態】本発明のフォトリソニック結晶及びその作製方法の実施の形態を、図面を参照して詳細に説明する。図1は、本実施の形態におけるフォトリソニック結晶の周期構造を示す斜視図である。図2は、本実施の形態におけるフォトリソニック結晶の螺旋構造を示す正面図である。図3は、本実施の形態におけるフォトリソニック結晶の第1の作製方法を示す斜視図である。図4は、本実施の形態におけるフォトリソニック結晶の第2の作製方法を示す斜視図である。

【0015】《フォトリソニック結晶の構成》本実施の形態におけるフォトリソニック結晶10は、図1(a)に示すように基板11の上に屈折率の異なる2種類の異なる屈折率を有する材料部分(低屈折率材料部12a、高屈折率材料部12b)を螺旋状に形成してなる柱状体12を、

2次元配列することで構成される。各柱状体12は二重螺旋構造を含む多重螺旋構造となる。本実施の形態において、基板11はシリコン(Si)よりなる。また、低屈折率材料部12aは二酸化珪素(SiO_2 、屈折率1.4)よりなり、高屈折率材料部12bはシリコン(Si、屈折率3.5)よりなる。低屈折率材料部12aと高屈折率材料部12bは、それぞれ連続した二重螺旋構造の柱状体12を構成している。二重螺旋構造を形成する一つの材料部分の厚みd(特にコアとなる材料部分の厚みd)は、目的とする光の波長の約 $1/2$ 程度である。なお、図2は高屈折率材料部12b(つまりシリコン)による螺旋構造(コアとなる部分)を基板11とともに示しているが、基板11上に形成される低屈折率材料部12aによる螺旋構造(クラッドとなる部分)も図2に示すものと同様のものになる。ここで、図1などにおいて符号12sで示される部分は、基板11上に形成された最初の螺旋一段分である。本実施の形態において、この最初の螺旋一段分12sは基板11及び高屈折率材料部12bと同じ材質(シリコン[Si])よりなる。なお、図1など(図2～図4)において、柱状体12の上面部分や最初の螺旋一段分12sの上面部分などが階段状になっているが、これは螺旋状であることを図面において強調するための記載であり、実際上はこのような階段状にはなっていない。ただし、階段状にすることも可能である。

【0016】本実施の形態のフォトリソニック結晶10は、①柱状体12を構成する低屈折率材料部12aと高屈折率材料部12bの屈折率の比が2以上と大きく開いていること、②柱状体12が周期的な螺旋構造を有していること、③基板11上に柱状体12が周期的に配列していること、そして、④螺旋を構成する材料部分(殊に高屈折率材料部12b)の厚みdが目的とする光の波長の約 $1/2$ であることから、フルフォトリソニックバンドギャップを形成することができる。また、この構造は右回りと左回りの対称性が崩れているため右水晶と左水晶の場合のように、旋光性を持ち得る。このようなフォトリソニック結晶は、フルフォトリソニックバンドギャップを利用して発光素子(レーザやLED)などに使用される。また、旋光性を利用して人工旋光性物質として使用される。

【0017】前記したフォトリソニック結晶10を構成する材料は、基板11がシリコン、柱状体12を構成する低屈折率材料部12aが二酸化珪素、同様に柱状体12を構成する高屈折率材料部12bがシリコンであるが、材料はこれらに限定されることはない。また、基板11、低屈折率材料部12a、高屈折率材料部12bが結晶質であるか非晶質であるかも問わない。さらに、柱状体12は2種類の異なる屈折率を有する材料で構成したが、2種類に限定されるものではない。

【0018】《フォトリソニック結晶の作製方法》以下、本発明の実施の形態におけるフォトリソニック結晶10の作製

方法（第1の作製方法、第2の作製方法）を説明する。
 【0019】〔第1の作製方法、図3参照〕第1の作製方法は、基板11の上に最初の螺旋一段分12sを作製し（工程A）、この最初の螺旋一段分12sそのものの上に交互に低屈折率材料部12aと高屈折率材料部12bを螺旋一段分ずつ積み重ねて行く（工程B）フォトニック結晶10の作製方法である。つまり、工程Aにより最初の螺旋一段分12sを作製するプロセスと、工程Bによりこの最初の螺旋一段分12sのパターン上にこのパターンを忠実に転写しながら異なる屈折率を有する材料を積層して柱状体12を作製するプロセスに分けられる。なお、柱状体12の作製はバイアススパッタにより行なう。

【0020】(1) 先ず、シリコンよりなる基板11上にレジスト31を塗布する。一般に電子ビーム露光においては、現像後に残るレジストの厚さは露光量（露光ドーズ量）に依存するため、露光量を場所によって変化させながら露光を行うと、現像後のレジストパターンの膜厚を場所によって変えることができる。この原理を用いて、基板11上に塗布したレジスト31上（図3(a)参照）に、露光量を場所により変えながら露光する。これにより図3(b)に示すように、最初の螺旋一段分12sを作製するためのレジストパターン32を、基板11上に形成することができる。

【0021】(2) この後に、レジストパターン32と基板11とを等速で削ることができる垂直性の良いドライエッチング（反応性イオンエッチングなど）により、この螺旋形状のレジストパターン32を基板11に転写する。そして、残りのレジストパターン32を剥離する。すると図3(c)に示すような、螺旋形状（すなわち最初の螺旋一段分12s）が形成された基板11が作製される。つまり、レジストパターン32の厚みが場所により異なるため、エッチングされる量もレジストパターン32の厚みに応じて変化し（すなわち基板11に加えてレジストパターン32もエッチングされるため）、結果としてレジストパターン32の形状（厚み）に応じた形状が基板11上に形成される。ここまでは前半の作製工程Aである。なお、最初の螺旋一段分12sの高さ（厚さ）は、ここでは2dである。最初の螺旋一段分12sの厚さは、レジストパターン32と基板11とのエッチングにおける選択比などにより支配される。ちなみに、最初の螺旋一段分12sは、図1(b)に示すように2次元格子点に配列させるが、図3では便宜上、一つの格子点の最初の螺旋一段分12s（柱状体12）のみを図示する。

【0022】(3) 続いて、この最初の螺旋一段分12sが形成された基板11上に、バイアススパッタにより低屈折率材料部12a（ここでは二酸化珪素、屈折率1.4）と高屈折率材料部12b（ここではシリコン、屈折率3.5）を交互に螺旋一段分ずつ積層する。バイアス

スパッタにおいては、エッチングとデポジションが同時に起こり、両者の寄与の比をバイアスなどのスパッタ条件によって制御することができる。さらに、エッチングとデポジションの角度依存性が異なる性質を利用すると、スパッタ条件を適当に選ぶことにより始めの基板の初期形状を忠実に保ったまま多層膜を積層することができる。この技術は、自己クローニング技術として知られている（S.Kawakami, Electronics Letter, vol.33, p1260 (1997)）。この予め定めておいた積層条件を用いて、最初の螺旋一段分12sが形成された基板11上に、低屈折率材料部12aを最初の螺旋一段分12sの厚さである2dの半分の厚さdで積層する（図3(d)参照）。積層する際には、最初の螺旋一段分12s以外の平面部にも積層が起こるが、作製される形状がわかりやすいように、各図では平面部の積層は無視して最初の螺旋一段分12s上の積層のみを図示している。

【0023】(4) 次に、低屈折率材料部12aよりなる螺旋一段分の上に、高屈折率材料部12bよりなる螺旋一段分を同じく厚さdで積層する。これにより図3(e)に示す形状が形成される。以降は、図3(d)における螺旋一段分の積層と図3(e)における螺旋一段分の積層を繰り返すことにより、図3(f)のように低屈折率材料部12aよりなる螺旋一段分と高屈折率材料部12bよりなる螺旋一段分がそれぞれ二重螺旋形状につながった構造が作製される。図3(f)では立体構造が少々わかりにくい、高屈折率材料部12bの部分（つまりシリコン部分）のみを表示すると図2のようになり、高屈折率材料部12bが螺旋形状になっていることがわかる。

【0024】柱状体12を配置する格子は、はじめのリソグラフィによって正方格子、三角格子など自由に変わることができ、正方格子及び三角格子からスタートした柱状体12の配置構造に関してはフルフォトニックバンドギャップが開くことがわかっている。また、任意の格子に対して作製されるフォトニック結晶の構造は、上面から見ると右回りと左回りの対称性が崩れており、人工旋光性を持ちうることは明らかである。また、この第1の作製方法では、構成材料としてシリコンと二酸化珪素を用いたが、バイアススパッタによる形状制御は他の物質においても可能であり、この材料の組み合わせに制限されないことは自明である。

【0025】〔第2の作製方法、図4参照〕第2の作製方法は、フォトニック結晶10を作製する基板11とは異なる他の基板21上に、最初の螺旋一段分12sに相当する螺旋一段形状22sを2次元配列させ、この他の基板21を押し型20として、基板11上に形成された薄膜ts'に押し型20を押し付けることにより最初の螺旋一段分12sを転写する工程A。そして、この工程Aに続いて、屈折率の異なる薄膜ta'、tb'を順次螺旋一段分ずつ積層し、薄膜を一段積層する毎に押し型

20により螺旋一段形状22sを順次転写して柱状体12を2次元配列させる工程Bにより、フォトニック結晶10を作製するものである。なお、このように微細形状の型（モールド）を押し付けて他の材料を同一形状に加工する技術は、一般にナノプリント技術と呼ばれている。

【0026】(1) 先ず、フォトニック結晶10を作製する基板11とは異なる他の基板21（ここではシリコンよりなる）に、最初の螺旋一段分12sに相当する螺旋一段形状22sを2次元配列させる。この2次元配列させる方法は、第1の作製方法で説明したのと同様の手段による。つまり、他の基板21上にレジストを塗布し、露光量をレジストの場所によって変化させて露光して、レジストパターンを形成する。その後、このレジストパターンに基づいてドライエッチングを行なうことにより、螺旋一段形状22sが2次元配列される。なお、螺旋一段形状22sの高さ（厚さ）は、ここでは2dである。以後、この螺旋一段形状22sが2次元配列された他の基板21は、押し型20（モールド）として使用される。

【0027】(2) 次に、基板11上にPZT溶液（チタン酸ジルコン酸鉛）を回転塗布（スピコート）し、この塗膜を熱処理してPZTからなる薄膜ts'（軟らかい薄膜）を基板11上に形成する。この薄膜ts'の厚さは、加熱硬化後の厚さが2dになるようにする。この後、この薄膜ts'に押し型20を押し付けて最初の螺旋一段分12sの形状を転写（刻印）する（図4(a)参照）。形状転写の後、薄膜ts'を加熱（アニール）して硬化させる。これにより薄膜ts'は、屈折率2.6の透明材料よりなる硬い薄膜ts（屈折率2.6）になる。この硬化後の薄膜tsが、特許請求の範囲の記載における最初の螺旋一段分12sになる。

【0028】(3) 続いて、最初の螺旋一段分（図1などにおいて12sで示される）が形成された基板11上に、酸化珪素複合材料塗布液を回転塗布して薄膜ta'（軟らかい薄膜）を形成する。薄膜ta'は、加熱硬化した後の薄膜ta（硬い）の厚さがdになるように形成される。ちなみに、酸化珪素複合材料塗布液は、押し型20によりあけられた穴の部分（図示外）にも満たされる。薄膜ta'を形成した後、最初の螺旋一段分と同じ位置の上に、押し型20を押し付ける。この際、押圧力を調節して、加熱硬化した後の薄膜taの厚さがdになるようにする。これにより、螺旋一段形状22sが転写（刻印）される。そして、薄膜ta'を加熱して硬化させ、二酸化珪素よりなる薄膜ta（屈折率1.4）とする（図4(b)参照）。この螺旋一段形状22sを転写した薄膜taが、特許請求の範囲の記載における低屈折率材料部12aよりなる螺旋一段分になる。

【0029】(4) 今度は、PZT溶液を回転塗布し熱処理してPZTよりなる薄膜tb'（軟らかい薄膜）を形

成する。薄膜tb'は、加熱硬化した後の薄膜tbの厚さがdになるように形成される。PZT溶液は押し型20によりあけられた穴の部分（図示外）にも満たされる。そして、最初の螺旋一段分と同じ位置の上に（前記(3)での操作によりあけられた穴と同じ位置でもある）、押し型20を押し付ける。この際、押圧力を調節して、加熱硬化した後の薄膜tbの厚さがdになるようにする。これにより螺旋一段形状22sが転写（刻印）される。そして、薄膜tb'を加熱して硬化させ、PZTよりなる薄膜tb（屈折率2.6）とする（図4(c)参照）。この螺旋一段形状22sを転写した薄膜tbが、特許請求の範囲の記載における高屈折率材料部12bよりなる螺旋一段分になる。

【0030】(5) 引き続き、前記(3)での操作及び前記(4)での操作を繰り返して、所定段数の薄膜(ta, tb)を積み重ねて柱状体12を形成する。

【0031】このように、薄膜ta', tb'（軟らかい薄膜）を形成した後、押し型20により型押しして形状を転写（刻印）し、これを加熱硬化して順次積層することでも、図1(a)に示す、低屈折率材料部12aと高屈折率材料部12bの同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体12を2次元配列したフォトニック結晶10を作製することができる。なお、各層の形状転写においては位置合わせが必要であるが、位置合わせにはX線リソグラフィにおけるステッパの位置合わせ技術を用いることができる。また、パターン深さ（厚さd, 2d）の調整には、ピエゾ電気素子を用いることができる。

【0032】この第2の作製方法では、形状が転写（刻印）される物質としてPZT及び酸化珪素を用いたが、ポリマーや酸化物など一般に刻印により加工可能な材料であれば同じ方法が適用可能であることは自明である。また、押し型20の基板（他の基板21）としてシリコンを用いたが、これも炭化珪素（SiC）など他の材料に置き換えることも可能であり、シリコンには限定されない。さらに、柱状体12を配置する格子は、押し型20によって正方格子、三角格子など自由に変えることができる。

【0033】以上、本発明の実施の形態につき説明したが、本発明は、必ずしも前記した手段及び手法に限定されるものではなく、本発明にいう目的を達成し、本発明にいう効果を有する範囲において適宜に変更実施することが可能である。例えば、本実施の形態においては2種類の材料からフォトニック結晶を作製したが、3種類以上の材料を適当に割り振り順番に積層しても同じような螺旋形状が作製されることは自明である。材料が3種類の場合は、3つの材料部分を足し合わせた厚さ（3つの材料部分よりなる螺旋一段分の厚さ）が、最初の螺旋一段分の厚さと同じになるようにする。逆に、厚みの基準となるのは、光が閉じ込められるコアとなる部分（高屈

折率材料部)であるので、先ずコアとなる部分の厚さを決定し、次に必要なクラッドの厚さを決定し、そして最初の螺旋一段分(押し型の螺旋一段形状)の厚さを決定する手順とすることができる。また、フォトニック結晶の作製方法として、バイアススパッタ技術とナノプリント技術を用いる方法について述べたが、半導体エピタキシャル成長などの他の方法によって、最初の螺旋形状を保存しながら積層を行っても同じ効果が期待できる。

【0034】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のフォトニック結晶によれば、フルフォトニックバンドギャップを形成することができ、発光素子や光導波路などに適用できる。また、本発明のフォトニック結晶の構造は、右回りと左回りの対称性が崩れているため、右水晶と左水晶の場合のように旋光性を持ち、直線偏光子として適用できる。また、本発明のフォトニック結晶の作製方法によれば、同一材料部分が連続的に螺旋状に連続的に繋がった柱状体を有するフォトニック結晶を確実に作製することができる。殊に、バイアススパッタ技術あるいはナノプリント技術を適用することで、本発明のフォトニック結晶を確実に作製することができる。また、本発明のフォトニック結晶の作製方法は、請求項1に記載のフォトニック結晶の作製に限定されることなく、他の構造を有するフォトニック結晶を作製する場合にも適用できる。さらに、本発明によれば、最初の螺旋一段分及び押し型を確実に精度よく作製することができる。この押し型は、何度もフォトニック結晶の作製に繰り返して使用することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本実施の形態におけるフォトニック結晶の周期構造などを示す斜視図である。(a)はフォトニック結晶を、(b)は基板上に形成された螺旋一段分を示す。この(b)は押し型を示すものでもある。

【図2】 本実施の形態におけるフォトニック結晶の螺旋構造を示す正面図である。

【図3】 本実施の形態におけるフォトニック結晶の第1の作製方法を示す斜視図である。(a)は基板とレジストを、(b)は基板上の形成されたレジストパターンを、(c)は最初の螺旋一段分を、(d)は最初の螺旋一段分の上に形成された低屈折率材料部よりなる螺旋一段分を、(e)は(d)の上に形成された高屈折率材料部よりなる螺旋一段分を、(f)は1本の柱状体を示す。

【図4】 本実施の形態におけるフォトニック結晶の第2の作製方法を示す斜視図である。(a)は最初の一段分の作製を、(b)は最初の螺旋一段分の上に形成された低屈折率材料部よりなる螺旋一段分を、(c)は(b)の上に形成された高屈折率材料部よりなる螺旋一段分を、(d)は順次螺旋一段分を積層して行く過程を示す。

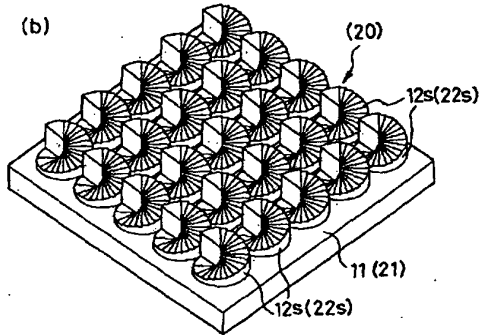
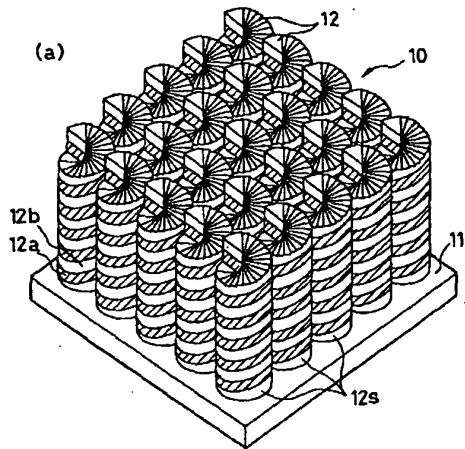
【図5】 従来における3次元フォトニック結晶の構造などを示す模式図である。(a)はドライエッチングによるものを、(b)はマイクロマシン技術によるものを示す。

【図6】 従来の作製方法によって作製されるフォトニック結晶型偏光子の構造を示す模式図である。(a)は板状体を並べたものを、(b)は柱状体を2次元配列したものを示す。

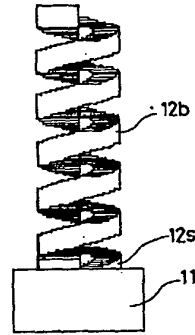
【符号の説明】

10	フォトニック結晶
11	基板
12	柱状体
12a	屈折率の異なる材料(低屈折率材料部)
12b	屈折率の異なる材料(高屈折率材料部)
12s	最初の螺旋一段分
20	押し型
21	他の基板
22s	螺旋一段形状
31	レジスト
32	レジストパターン
ta'	薄膜(低屈折率材料部12aを形成するための薄膜)
tb'	薄膜(高屈折率材料部12bを形成するための薄膜)
ts'	薄膜(最初の螺旋一段分12sを形成するための薄膜)

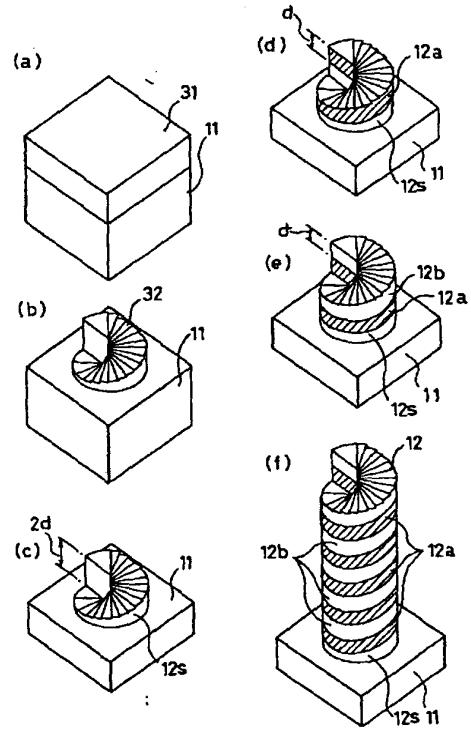
【図1】



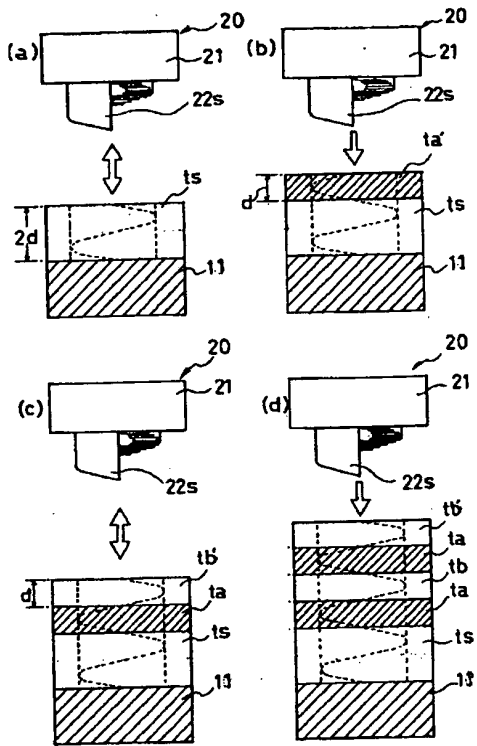
【図2】



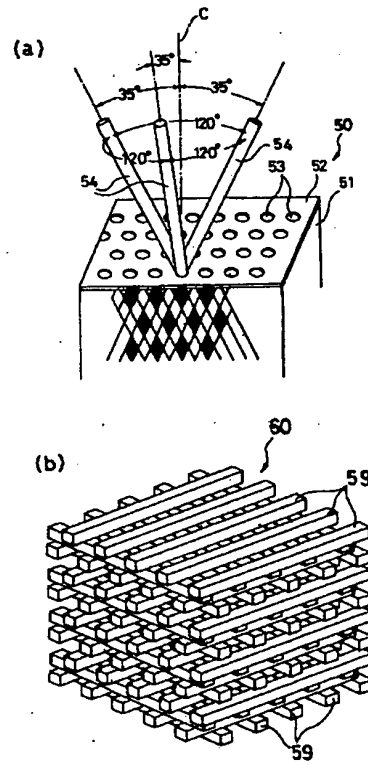
【図3】



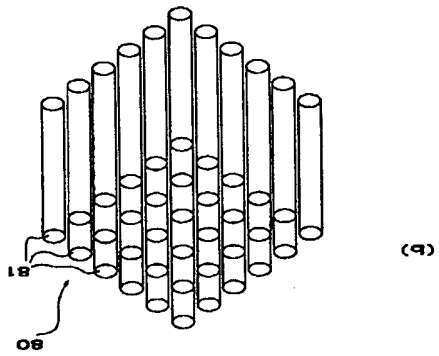
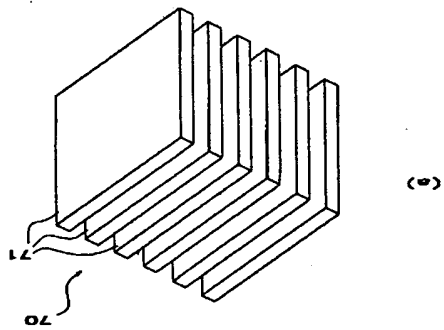
【図4】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

(72)発明者 玉村 敏昭
東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内
Fターム(参考) 2H047 PA02 PA04 PA22